

PERSISTANCE DE LA RACINE PIVOTANTE DES PLANTS DE PIN GRIS CULTIVÉS DANS LES RÉCIPIENTS 113-25, 67-50 ET 63-90F: EFFET DE L'ÂGE AU MOMENT DE LA PLANTATION

Par Denis Walsh, Jacques Allaire, Daniel Gagnon et Daniel Lord



Consortium de
recherche sur la
forêt boréale commerciale

UQAC

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTIMI**

Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : [http : //dsf.uqac.ca/boreale/](http://dsf.uqac.ca/boreale/)
© Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, 2012.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

Correspondance

Université du Québec à Chicoutimi
Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale
Département des Sciences fondamentales
a/s Daniel Lord
555, boul. de l'Université
Chicoutimi, Québec, G7H 2B1
Tél. : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012
Courrier électronique : Daniel_Lord@uqac.ca

**PERSISTANCE DE LA RACINE PIVOTANTE DES PLANTS DE PIN GRIS
CULTIVÉS DANS LES RÉCIPIENTS 113-25, 67-50 ET 63-90F:
EFFET DE L'ÂGE AU MOMENT DE LA PLANTATION**

Par :

Denis Walsh, M. Sc., professionnel de recherche
Jacques Allaire, agronome
Daniel Gagnon, technicien horticole
Daniel Lord, PhD, professeur chercheur
Université du Québec à Chicoutimi

Collaborateur :

Jean-Pierre Girard
Agent de recherche et de planification socioéconomique
Responsable régional de la production de semences et de plants
Direction des opérations intégrées du Saguenay - Lac-St-Jean
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

Université du Québec à Chicoutimi
et
Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale

Octobre 2012

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, direction régionale du Saguenay-Lac-St-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard du MRNF région 02 dont la collaboration et le support ont été indéfectibles tout au long de ce projet. Nous adressons aussi des remerciements à Mme Lysiane Blais et M. Esteban Gonzalez, étudiants au premier cycle en biologie, pour leur participation à la réalisation des différentes étapes du projet. Nous remercions aussi Mme Nancy Tanguay, responsable de la production des plants forestiers de la Coopérative forestière Girardville qui était consultante pour le calendrier de fertilisation durant la culture en récipient.

RÉSUMÉ

Le pin gris régénéré naturellement produit une racine pivotante qui permet un bon ancrage dans le sol. Par contre, le système racinaire des semis reboisés est généralement plus petit que celui des pins gris régénérés naturellement d'âge équivalent. De plus, le pivot est presque toujours absent. Notre hypothèse stipule que l'incidence des malformations racinaires pourrait augmenter avec le temps de culture en récipient. La culture du pin gris dans le récipient 113-25 pourrait être une solution puisque le temps de culture pour atteindre une taille commerciale est plus court dans ce type de récipient comparativement aux récipients conventionnels. Les racines latérales peuvent aussi être cernées en employant des récipients à parois ajourées tel le 63-90F, ce qui diminuerait en théorie l'incidence des malformations racinaires. Le but du projet est de comparer la morphologie racinaire des semis de pin gris cultivés dans des récipients 113-25 à ceux cultivés dans le récipient 63-90F. Deuxièmement, on veut vérifier si la persistance du pivot en plantation dépend de l'âge du semis au moment de la plantation. Les plants étaient âgés de 4, 6, 8 ou 10 semaines lorsqu'ils ont été repotés dans des pots de 3 ou 5 L. Ces huit combinaisons d'âge et de type de récipient ont été comparées à un lot 1+0 produit en 67-50. Trois échantillonnages ont été réalisés après 0, 4 et 11 semaines de croissance en pot. À la fin de la culture en récipient, le système racinaire était formé d'un pivot présent chez tous les semis cultivés en récipient 113-25 ou 63-90F ainsi que de racines latérales primaires qui prenaient leur origine du pivot. Durant la culture en pot, le pivot demeurait viable chez pratiquement tous les semis quelques soient l'âge des plants au moment du repotage à l'exception du lot 1+0 en 67-50. Les pivots secondaires prenaient leur origine de ramifications dans la zone apicale du pivot primaire. En moyenne, le nombre de pivots secondaires variait entre 3 et 4 et la croissance en longueur était plus forte chez les plants 63-90F. Le nombre de racines actives augmentaient en fonction de l'âge au moment du repotage, plus rapidement pour les plants cultivés en 63-90F. Notre essai en pot démontre que des semis de pin gris cultivé dans le récipient 63-90F possèdent une capacité de croissance après plantation supérieure à celles des 113-25 ou même des 67-50 qui étaient pourtant nettement plus gros au moment de la plantation. Dans la grande majorité des cas, trois à quatre pivots secondaires actifs continuaient leur elongation après la plantation des semis 113-25 ou 63-90F.

Mots-clés : 113-25, 63-90F, pin gris, *Pinus banksiana*, pivot, racine pivotante, racines latérales, récipient à parois ajourées.

TABLES DES MATIÈRES

| | |
|---|-----|
| REMERCIEMENTS..... | iii |
| RÉSUMÉ..... | v |
| TABLES DES MATIÈRES..... | vii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | ix |
| LISTE DES FIGURES..... | xi |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| MATÉRIEL ET MÉTHODE..... | 2 |
| Expérience 1 : 113-25 vs 63-90F et date de semis..... | 2 |
| Expérience 2 : 113-25 vs 63-90F et 67-50..... | 4 |
| RÉSULTATS..... | 5 |
| Mesures initiales au moment du repotage..... | 5 |
| Expérience 1 : 113-25 vs 63-90F et date de semis..... | 5 |
| Expérience 2 : 113-25 vs 63-90F et 67-50..... | 8 |
| DISCUSSION..... | 11 |
| CONCLUSION..... | 13 |
| RÉFÉRENCES..... | 14 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Mesures initiales avant le repotage des plants cultivés pendant 4, 6, 8 ou 10 semaines en récipients 113-25 ou 63-90F ainsi que du lot 1-0 en récipient 67-50..... | 6 |
| Tableau 2. Modèle linéaire généralisé (GLM) du % de pivot actif lors du repotage..... | 6 |
| Tableau 3. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines actives après 4 semaines en pot. (B) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur après 4 et 11 semaines en pot..... | 6 |
| Tableau 4. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) sur la présence du pivot et de son origine. (B) % de plants ayant une racine pivotante et % de plants dont le pivot est d'origine primaire..... | 7 |
| Tableau 5. Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines pivotantes..... | 7 |
| Tableau 6. Sommaire de l'ANOVA de la longueur du pivot..... | 7 |
| Tableau 7. Sommaire de l'ANOVA des variables morphologiques mesurées 11 semaines après le repotage..... | 8 |
| Tableau 8. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines actives après 4 semaines en pot et (B) du nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur après 4 et 11 semaines en pot..... | 9 |
| Tableau 9. Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) sur la présence du pivot et de son origine..... | 9 |
| Tableau 10. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines pivotantes 11 semaines après le repotage et (B) sommaire de l'ANOVA de la longueur du pivot principal 4 et 11 semaines après le repotage..... | 10 |
| Tableau 11. Sommaire de l'ANOVA de l'effet du récipient sur les variables morphologiques mesurées 11 semaines après le repotage..... | 10 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Caractéristiques des trois types de récipient utilisés dans cette expérience. Les photographies des récipients 113-25 et 67-50 proviennent de Stuewe & Sons Tree Seedling Nursery Containers (http://www.stuewe.com/products/rigipots.php) et celle du récipient 63-90F de Gingras et Girard (1999)..... | 2 |
| Figure 2. Méristème apical actif à gauche et inactif à droite..... | 3 |
| Figure 3. (A-D) Groupes cultivés dans le récipient 113-25 pendant 4, 6, 8 et 10 semaines. (E-H) Groupes cultivés dans le récipient 63-90F pendant 4, 6, 8 et 10 semaines. Un petit carreau représente 1 cm..... | 5 |
| Figure 4. Développement racinaire après 10 semaines (A) en récipient 113-25, (B) en récipient 63-90F et (C) après une saison de culture en récipient 67-50. P: pivot..... | 5 |
| Figure 5. (A) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot en fonction de l'âge à la plantation. (B) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm après 4 et 11 semaines en pot en fonction du type de récipient. (C) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm après 4 et 11 semaines en pot en fonction de l'âge à la plantation (moyennes pour les plants 113-25 et 63-90F). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différents à $P \leq 0,05$ | 6 |
| Figure 6. Développement racinaire après 11 semaines en pot d'un plant cultivé (A) en récipient 113-25 pendant 10 semaines, (B) en récipient 63-90F pendant 10 semaines et (C) en récipient 67-50 (1+0). P : pivot..... | 7 |
| Figure 7. Variables morphologiques mesurés 11 semaines après la plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différents à $P \leq 0,05$ | 8 |
| Figure 8. (A) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot en fonction du type de récipient. (B) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm de longueur en fonction du nombre de semaines en pot. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%..... | 9 |
| Figure 9. (A) Nombre de racines pivotantes secondaires en fonction de l'âge à la plantation pour les deux types de récipient. (B) Longueur des racines pivotantes secondaires en fonction du nombre de semaines en pot pour les deux types de récipient. * significativement différents à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%..... | 9 |
| Figure 10. (A) Pourcentage de semis de pin gris possédant un pivot en fonction des types de récipient. (B) Pourcentage de semis de pin gris possédant un pivot d'origine primaire en fonction du type de récipient. Les pourcentages surmontés de lettres différentes sont différents à $P \leq 0,05$ | 9 |
| Figure 11. (A) Nombre de racines pivotantes secondaires en fonction du type de récipient. (B) Longueur des racines pivotantes secondaires en fonction du type de récipient. (C) Longueur du pivot en fonction du nombre de semaines en pot. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%..... | 10 |
| Figure 12. Effet du type de récipient sur les différents paramètres de croissance des semis de pin gris, 11 semaines après le repotage. Les moyennes surmontées d'une lettre différente sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%..... | 10 |

INTRODUCTION

Le pin gris est l'espèce de pin la plus répandue au Canada (Rudolph et Burns 1983). Il s'agit d'une essence largement utilisée comme bois de sciage au Québec et son aire de distribution couvre de larges portions de la forêt boréale. Cette espèce se retrouve en peuplements purs ou mélangés avec l'épinette noire (Rudolph et Burns 1983). Ses cônes sérotimeux lui permettent de se régénérer facilement après feu (Gauthier et al. 1993) et son installation est très rapide, 95% des semis s'installant pendant les trois premières saisons de croissance suivant le feu (St-Pierre et al. 1992). Par contre, après une coupe forestière, le reboisement est nécessaire s'il n'y a pas de régénération préétabli. En 2007-2008, années les plus récentes où les statistiques forestières sur le reboisement au Québec sont disponibles, 32,7 millions de pins gris ont été mis en terre dans les forêts publiques du Québec (MRNF 2010). Les plants de pin gris sont produits en récipients dont les cavités sont de 50, 110, 200 ou 300 cc (MRNF 2011). Des essais expérimentaux ont été réalisés dernièrement pour produire le pin gris dans le nouveau récipient 113-25 (Lord et al. 2011).

Le pin gris régénéré naturellement produit une racine pivotante qui permet un bon ancrage et un accès à l'eau présente dans les couches plus profondes du sol (Strong et La Roi 1983). La distribution des racines le long de la souche et la vitesse de croissance durant les premières années sont meilleures chez les pins gris régénérés naturellement comparativement aux pins gris reboisés (Nichols et Alm 1983, Plourde et al. 2009). Lorsque les plants forestiers sont produits en récipients, ils développent souvent des déformations racinaires (Carlson et Nairn 1977). Les principales sont l'absence de pivot, l'étranglement des racines, l'enroulement des racines sur elles-mêmes (spiralisation), la croissance verticale vers le bas des racines latérales causée par la compression de la paroi de la cavité du récipient et l'entortillement des racines qui forment un «chignon» (Marquestaut 1978). De plus, le pivot est absent dans la grande majorité des cas (Plourde et al. 2009). Lorsqu'ils sont plantés en forêt, ces semis développent de nouvelles racines uniquement dans la portion supérieure de la carotte ou à l'extrémité inférieure de celle-ci (Balisky et al. 1995). Ces défauts persistent plusieurs années et il est commun de voir une masse racinaire formant un chignon compacte dans le volume qu'occupait la carotte à l'origine ainsi que quelques racines de surface. Le pivot est généralement absent.

Ces déformations racinaires causées par le récipient et qui persistent en plantation sont soupçonnées d'engendrer des

problèmes de stabilité à long terme. La plupart des espèces de pin sont généralement plus à risque aux déformations racinaires en récipient et sont donc plus sensibles à voir leur tige déformée par le vent, la neige ou à cause du déchaussement par le gel (Rune 2003). Les problèmes de stabilité des pins tendent à s'accroître avec la durée de la culture en récipient (Balisky et al. 1995). Selon Burdett et al. (1986), les déformations de la tige des pins lodgepole reboisés en Colombie-Britannique seraient reliées aux déformations racinaires des semis. La stabilité des plantations de pins gris est aussi jugée préoccupante en Ontario à cause du même problème de déformation racinaire (Obenchain 2003). Chez *Pinus pinaster*, l'architecture racinaire qui permet une bonne résistance au vent consiste en une racine pivotante plongeant profondément dans le sol et un large éventail de racines latérales peu profondes (Danjon et al. 2005). Les pins gris régénérés naturellement ont des racines distribués symétriquement autour de l'axe de l'arbre en plus de posséder une racine pivotante dans presque tous les cas (Plourde et al. 2009). Les racines verticales jouent un rôle très important dans la stabilité des arbres qui croissent sur des sols sablonneux (Dupuy et al. 2005). Un premier inventaire réalisé au Québec et portant sur la stabilité des plantations a montré que 10% des tiges de pin gris présentaient un écart par rapport à la verticale, 13 à 21% une courbure basale et deux plantations sur 19 étaient considérées instables (Sheedy 1990). Sheedy (1991) relie l'instabilité des pins gris en plantation, qui peut atteindre 15% des arbres, aux déformations racinaire, principalement des chignons, l'enroulement des racines, des racines soudées et des crosses. Ce problème est particulièrement aigu sur les sols argileux. Dans un inventaire réalisé en Abitibi de 1989 à 1991, Sheedy (1993) signale que 17% des plantations de pins gris cultivés en récipient et âgées de 5 à 10 ans sont instables.

Selon Plourde et Krause (comm. pers.), l'incidence des malformations pourrait augmenter avec le temps de culture en récipient. D'ailleurs, Sheedy (1996) a observé un pourcentage plus important des déformations racinaires en plantation chez les pins gris cultivés en récipient 45-110 comparativement à ceux cultivés en 67-50. La durée de culture, la densité (nombre de semis par m²) ainsi que le volume de l'alvéole modulent l'architecture de la tige et du système racinaire d'une manière différente pour chaque espèce et la performance sur le site de reboisement est directement reliée à la morphologie du plant.

Différentes techniques ont été mises en œuvre pour améliorer la morphologie du système racinaire des plants forestiers

produits en récipient. Les racines peuvent être cernées par le cuivre ou par l'air (Landis et Willis 2008). Les récipients à parois ajourées utilisent ce dernier mécanisme. Ils sont formés d'alvéoles dans lesquelles des ouvertures sont présentes; les racines sont inhibées lorsqu'elles arrivent au contact de l'air (Gingras et Richard 1999). Différents types de récipients ajouré sont disponibles sur le marché (Landis 2005); citons à titre d'exemple les récipients ajourés IPL® Rigidpot™ de 200 ou 350 cc de capacité (Stuewe 2008), différents gabarits de récipients Plantek® dont les alvéoles varient de 50 à 275 cc et qui sont fabriqués par la firme suédoise Lännen Tehtaat Oyj (2012). Au Québec, les travaux de Gingras et Richard (1993, 1999) ont permis le développement d'un récipient à parois ajourées, le 25-360A pour la production de PFD. Ce récipient est utilisé tant pour la production de plants résineux que de feuillus de fortes dimensions (Gingras et al. 2002). Les régies de culture ont dû être adaptées pour ce type de production et de nombreux chercheurs du MRNF ont contribué à l'avancement des connaissances pour la production de PFD en récipients ajourées (Lamhamedi et al. 2001, Stowe et al. 2001, Lamhamedi et al. 2003, Bergeron et al. 2004, Stowe et al. 2010).

Il a été démontré que le nombre de déformations racinaires augmente avec le temps de résidence du semis dans son récipient (Landis 1990). Plus la durée de culture en récipient est longue, plus nombreuse sont les racines déformées vers le bas et plus aigus sont les problèmes de stabilité des plantations de pins (Balisky et al. 1995). Pour cette raison, la culture du pin gris dans un récipient rigide composé de petites alvéoles de 25 cc pourrait s'avérer la solution toute indiquée pour diminuer le nombre des déformations racinaires. Ce type de récipient est maintenant largement utilisé pour la culture de l'épinette noire. De plus, une plantation opérationnelle comprenant des plants de pin gris cultivés en récipient ajouré 63-90F installée au Lac-St-Jean a été échantillonnée en 2008. Des résultats préliminaires ont montré que les pins gris qui avaient été cultivés en 63-90F possédaient tous une racine pivotante (C. Krause, communication personnelle).

Le but du projet est de comparer la morphologie racinaire des semis de pin gris cultivés dans le récipient 113-25 à ceux cultivés dans le récipient 63-90F. Deuxièmement, on veut vérifier si la persistance du pivot en plantation dépend de l'âge du semis au moment de la plantation. Notre première hypothèse est que l'inhibition de la croissance des racines latérales par les cavités ajourées stimulerait la croissance du pivot qui continuerait sa croissance après la plantation alors que la seconde stipule que les déformations racinaires


seraient moins importantes lorsque le temps de culture en récipient est réduit.


MATÉRIEL ET MÉTHODE

Expérience 1 : 113-25 vs 63-90F et date de semis

Les plants de pin gris ont été produits dans une serre recouverte de plastique sur le campus de l'Université du Québec à Chicoutimi (48°25'N, 71 04'O). Les plants ont été produits dans des récipients de 113 cavités (IPL®, 113-25) ou de 63 cavités (Plantek, 63-90F). Le récipient 113-25 possède 113 cavités de forme hexagonale dont le volume est de 25 cc qui sont munies de rainures pour diriger les racines vers le trou de drainage. Le récipient 63-90F est à parois ajourées et possède 63 cavités de forme rectangulaire dont le volume est de 90 cc. Les caractéristiques des récipients sont illustrées à la figure 1.

Trois à quatre graines ont été semées par alvéole sur un substrat de tourbe et les semis ont été éclaircis à une plantule par alvéole lorsque ceux-ci étaient au stade des cotylédons. La provenance des graines de pin gris était la sui-

| 113-25 (IPL Inc.) | | |  |
|----------------------------|----------------------------|--|---|
| | | | |
| Longueur : | 36 cm | | |
| Largeur : | 22 cm | | |
| Profondeur : | 6,8 cm | | |
| Surface : | 0,079 m ² | | |
| Matériau : | Polyéthylène haute densité | | |
| Nombre de cavités : | 113 | | |
| Diamètre de la cavité : | — | | |
| Côté de la cavité : | 2,5 x 2,8 cm | | |
| Volume de la cavité : | 25 cc | | |
| Plants au m ² : | 1432 | | |

| 67-50 (IPL Inc.) | | |  |
|----------------------------|----------------------------|--|---|
| | | | |
| Longueur : | 35,4 cm | | |
| Largeur : | 22,2 cm | | |
| Profondeur : | 9 cm | | |
| Surface : | 0,078 m ² | | |
| Matériau : | Polyéthylène haute densité | | |
| Nombre de cavités : | 67 | | |
| Diamètre de la cavité : | 3,2 cm | | |
| Côté de la cavité : | — | | |
| Volume de la cavité : | 50 cc | | |
| Plants au m ² : | 853 | | |

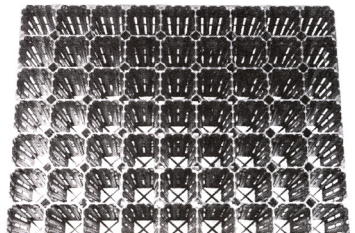
| Plantek 63-90F (Lännen) | | |  |
|----------------------------|----------------------------|--|---|
| | | | |
| Longueur : | 39,8 cm | | |
| Largeur : | 29,6 cm | | |
| Profondeur : | 9 cm | | |
| Surface : | 0,1178 m ² | | |
| Matériau : | Polyéthylène haute densité | | |
| Nombre de cavités : | 63 à parois ajourées | | |
| Diamètre de la cavité : | — | | |
| Côté de la cavité : | 4,2 cm | | |
| Volume de la cavité : | 90 cc | | |
| Plants au m ² : | 534 | | |

Figure 1. Caractéristiques des trois types de récipient utilisés dans cette expérience. Les photographies des récipients 113-25 et 67-50 proviennent de Stuewe & Sons Tree Seedling Nursery Containers (<http://www.stuewe.com/products/rigidpots.php>) et celle du récipient 63-90F de Gingras et Girard (1999).

vante : PIG-VI-PAR-2-2, lot 2006-054-2-J. Durant la culture en récipient, l'irrigation et la fertilisation étaient effectuées selon les procédures standards utilisées pour ce type de production (Lord et al. 2011). Une solution fertilisante 20-8-20 était appliquée manuellement à partir de la deuxième semaine à raison de 0,8 mg N/cavité pour les 113-25 et de 2,0 mg N/cavité pour les 63-90F pendant les sept premières semaines de croissance et une solution de 11-41-8 (0,4 mg N/cavité pour les 113-25, 2,0 mg N/cavité pour les 63-90F), les semaines suivantes. Quatre semis ont été réalisés à chaque deux semaines : 20 mai, 2 juin, 16 juin et 30 juin. Les plants étaient sortis à l'extérieur à la quatrième semaine sauf pour le dernier semis puisque les plants n'ont séjourné en serre que deux semaines avant d'être repotés.

Le 29 juillet 2008, les plants ont été prélevés et repotés, à raison de cinq plants par pot, dans des pots de trois litres (18 cm de diam.) remplis de tourbe horticole pour les plants produits en 113-25 et de cinq litres (22 cm diam.) pour ceux produits en 63-90F. Au total 100 plants pour chaque combinaison de date de semis x type de récipient ont été cultivés pour cette expérience. Les pots ont été placés sur l'aire de croissance extérieure dans un dispositif complètement aléatoire. Les pots étaient arrosés au besoin mais n'étaient pas fertilisés.

Un échantillonnage destructif a été réalisé le 29 juillet 2008 au moment du repotage pour caractériser les populations de plants. Pour chaque lot de plants, 36 semis ont été échantillonnés au hasard et la hauteur et le diamètre de la tige ont été mesurés. Un sous-échantillon de 10 plants par lot a été choisi au hasard et la présence/absence de pivot a été notée, le fait qu'il soit cerné ou pas et le fait que le méristème apical soit actif ou inactif; un méristème actif est de couleur blanchâtre et translucide tandis qu'un méristème inactif est nécrosé et de couleur brune (Fig. 2). La longueur du pivot et la plus longue racine ont été mesurées. Un second échantillonnage a été réalisé après quatre semaines sur les plants poussant en pot soit les 10 plants de deux pots par combinaison de facteurs. Le système racinaire a été caractérisé de la façon suivante :

- Pivot, présence/absence.
- Pivot d'origine primaire ou secondaire¹.
- Longueur du pivot.
- Nombre de racines de plus de 3 cm de longueur.

¹ le pivot est d'origine secondaire lorsqu'il y a des ramifications au niveau du méristème apical du pivot primaire.

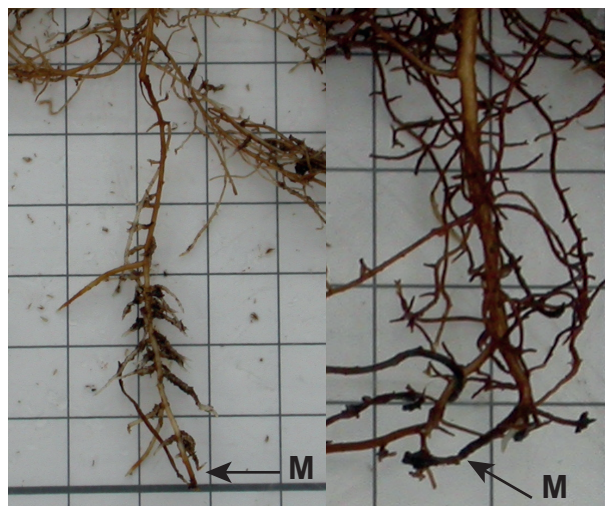


Figure 2. Méristème apical actif à gauche et inactif à droite.

- Nombre de racines actives.

Un troisième échantillonnage a été réalisé après que les plants aient séjourné 11 semaines en pot. Cet échantillonnage comprenait lui aussi 2 pots de 5 plants par combinaison de facteurs. Les mesures suivantes ont été prises :

- Hauteur et diamètre de la tige.
- Biomasses sèches de la tige et des racines.
- Pivot, présence/absence.
- Pivot d'origine primaire ou secondaire.
- Longueur du pivot.
- Nombre de racines de plus de 3 cm de longueur.

Les variables ont été étudiées à l'aide d'une analyse de variance factorielle complètement aléatoire avec sous-échantillonnage selon l'un ou l'autre des deux modèles suivants :

Modèle 1 : $Y_{ijkl} = \mu + A_i + R_j + (AR)_{ij} + P_k + \varepsilon_{l(ijk)}$ où

Y_{ijkl} = valeur observée sur un plant l , dans le pot k , du récipient j , d'âge i ,

μ = moyenne générale de la hauteur, du diamètre ou des biomasses,

A_i = l'effet de l'âge i du plant au moment du repotage, $i = 4, 6, 8, 10$ semaines (effet fixe),

R_j = l'effet du type de récipient j , $j = 113-25, 63-90F$ (effet fixe),

$(AR)_{ij}$ = interaction entre l'âge i et le type de récipient j (effet fixe),

P_k = l'erreur associée au pot k , $k = 1, \dots, 16$ (effet aléatoire),

$\varepsilon_{l(ijk)}$ = l'erreur associée au plant l de chaque pot, $l = 1, \dots, 80$ (effet aléatoire).

$$\text{Modèle 2 : } Y_{ijklm} = \mu + T_i + A_j + (TA)_{ij} + R_k + (TR)_{ik} + (AR)_{jk} + (TAR)_{ijk} + P_l + \varepsilon_{m(ijkl)} \text{ où}$$

Y_{ijklm} = valeur observée sur un plant m , dans le pot l , du récipient k , d'âge j , à la semaine i ,

μ = moyenne générale de la longueur du pivot,

T_i = effet relié au temps i , $i = 4, 11$ semaines (effet fixe),

A_j = l'effet de l'âge du plant au moment du rempotage j , $j = 4, 6, 8, 10$ semaines (effet fixe),

$(TA)_{ij}$ = effet de l'interaction entre le temps i et l'âge du plant j (effet fixe),

R_k = l'effet du type de récipient k , $k = 113-25, 63-90F$ (effet fixe),

$(TR)_{ik}$ = effet de l'interaction entre le temps i et le type de récipient k (effet fixe),

$(AR)_{jk}$ = interaction entre l'âge j et le type de récipient k (effet fixe),

$(TAR)_{ijk}$ = effet de l'interaction entre le temps i , l'âge j et le type de récipient k (effet fixe),

P_l = l'erreur associée au pot l , $l = 1, \dots, 32$ (effet aléatoire),

$\varepsilon_{m(ijkl)}$ = l'erreur associée au plant m de chaque pot, $m = 1, \dots, 160$ (effet aléatoire).

La présence du pivot et son origine (primaire *versus* secondaire) ont été étudiées à l'aide du modèle linéaire généralisé (GLM) en utilisant une fonction de lien «Logit» d'une distribution binomiale. Les mêmes facteurs que ceux du Modèle 2 ont été utilisés. Le nombre de racines actives après quatre semaines en pot a aussi été étudié à l'aide du modèle linéaire généralisé (GLM) mais en utilisant la fonction de lien Logarithme d'une distribution de Poisson; les facteurs décrits dans le Modèle 1 ont été utilisés. Le nombre de racines pivotantes et le nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur ont été étudiés par un modèle linéaire généralisé (GLM) mais en utilisant la fonction de lien Logarithme d'une distribution de Poisson; les facteurs décrits dans le Modèle 2 ont été utilisés.

Dans le cas des analyses de variance, l'hétéroscédasticité a été vérifiée graphiquement en examinant la dispersion des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites (Montgomery 1984). La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide de l'histogramme de la distribution des résidus et un

test de Shapiro-Wilk a été réalisé simultanément (Shapiro-Wilk et Wilk 1965). Les modèles ont été testés à l'aide de la procédure REML du logiciel JMP, version 9.0.0 (2010, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). L'effet de l'âge du plant a été décomposé en ses composantes linéaire et quadratique (Kirk 1982). Les mêmes types de contrastes ont été utilisés pour les analyses GLM. Une réponse était jugée significative à un seuil de probabilité de 5%. Les moyennes sont présentées avec leurs intervalles de confiance à 95%.

Expérience 2 : 113-25 vs 63-90F et 67-50

Les plants cultivés en récipient 113-25 et 63-90F semés le 20 mai ont été utilisés pour cette partie de l'expérience. Des plants de pin gris cultivé en récipients 67-50 (1+0) à la coopérative forestière Girardville ont aussi été inclus dans le dispositif. Les consignes de culture sont donc les mêmes que précédemment. Les plants produits en récipient 113-25 ont été rempotés dans des pots de 3 l (18 cm de diam.) et ceux en 63-90F et 67-50 en pot de 5 l (22 cm de diam.) le 29 juillet 2008.

Les trois échantillonnages destructifs ont été réalisés aux mêmes dates que dans l'expérience 1. Les deux modèles suivants ont été utilisés :

$$\text{Modèle 3 : } Y_{ijk} = \mu + R_i + P_j + \varepsilon_{k(ij)} \text{ où}$$

Y_{ijk} = valeur observée sur un plant k , dans le pot j , du récipient i ,

μ = moyenne générale de la hauteur, du diamètre ou des biomasses,

R_i = l'effet du type de récipient i , $i = 126-25, 67-50, 63-90F$ (effet fixe),

P_j = l'erreur associée au pot j , $j = 1, \dots, 6$ (effet aléatoire),

$\varepsilon_{k(ij)}$ = l'erreur associée au plant k de chaque pot, $k = 1, \dots, 30$ (effet aléatoire).

$$\text{Modèle 4 : } Y_{ijkl} = \mu + T_i + R_j + (TR)_{ij} + P_k + \varepsilon_{l(ijk)} \text{ où}$$

Y_{ijkl} = valeur observée sur un plant l , dans le pot k , du récipient j , au temps i ,

μ = moyenne générale de la longueur du pivot,

T_i = effet relié au temps i , $i = 4, 11$ semaines (effet fixe),

R_j = l'effet du type de récipient j , $j = 126-25, 67-50, 63-90F$ (effet fixe),

$(TR)_{ij}$ = effet de l'interaction entre le temps i et le type de récipient j (effet fixe),

P_k = l'erreur associée au pot k , $k = 1, \dots, 12$ (effet aléatoire),

$\varepsilon_{ll(jk)}$ = l'erreur associée au plant l de chaque pot, $l = 1, \dots, 60$ (effet aléatoire).

Le nombre de racines actives après quatre semaines en pot, le nombre de pivot après 11 semaines ont été étudiés à l'aide du modèle linéaire généralisé (GLM) en utilisant la fonction de lien Logarithme d'une distribution de Poisson; les facteurs décrits dans le Modèle 3 ont été utilisés. La présence du pivot et de son origine ont été étudiées à l'aide du modèle linéaire généralisé (GLM) en utilisant une fonction de lien «Logit» d'une distribution binomiale. Les mêmes facteurs que ceux du Modèle 4 ont été utilisés. Le nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur ont été étudiés par un modèle linéaire généralisé (GLM) mais en utilisant la fonction de lien Logarithme d'une distribution de Poisson; les facteurs décrits dans le Modèle 4 ont été utilisés. Les moyennes par type de récipient ont été comparées par le test de t de Student dans le cas des analyses de variance.

RÉSULTATS

Mesures initiales au moment du repotage

Le degré d'enracinement variait fortement en fonction de l'âge des semis au moment de la mise en pot. Le développement du système racinaire des semis âgés de 4, 6 ou 8 semaines n'était pas assez avancé pour que la carotte possède une cohésion suffisante permettant son extraction sans que celle-ci se brise (Figure 3). Le système racinaire des plants produits en récipient 113-25 ou 63-90F était formé d'un pivot présent chez tous les semis et de racines latérales primaires qui prenaient leur origine du pivot formant un genre d'échelle² (Figure 4). Le système racinaire des plants produit en récipient 67-50 était beaucoup plus dense et les racines étaient fortement lignifiées; le pivot était aussi présent. La croissance du pivot était très rapide puisque ce dernier était cerné en atteignant le trou de drainage dans 100% des cas chez tous les lots à l'exception du lot de 63-90F cultivé en récipient pendant 4 semaines; dans ce dernier cas, seulement 30% des pivots étaient cernés (Tableau 1). Les pivots des plants cultivés en 113-25 ou en 63-90F avaient un méristème actif tandis que la proportion tombait à 0% pour les plants cultivés en 67-50 (Tableau 1-2). Les plants cultivés en 67-50 se distinguaient des autres lots par leur taille et leur rapport H/D plus élevé (Tableau 1).

² Voir Chapman et Colombo (2006) pour la définition des racines en échelle.

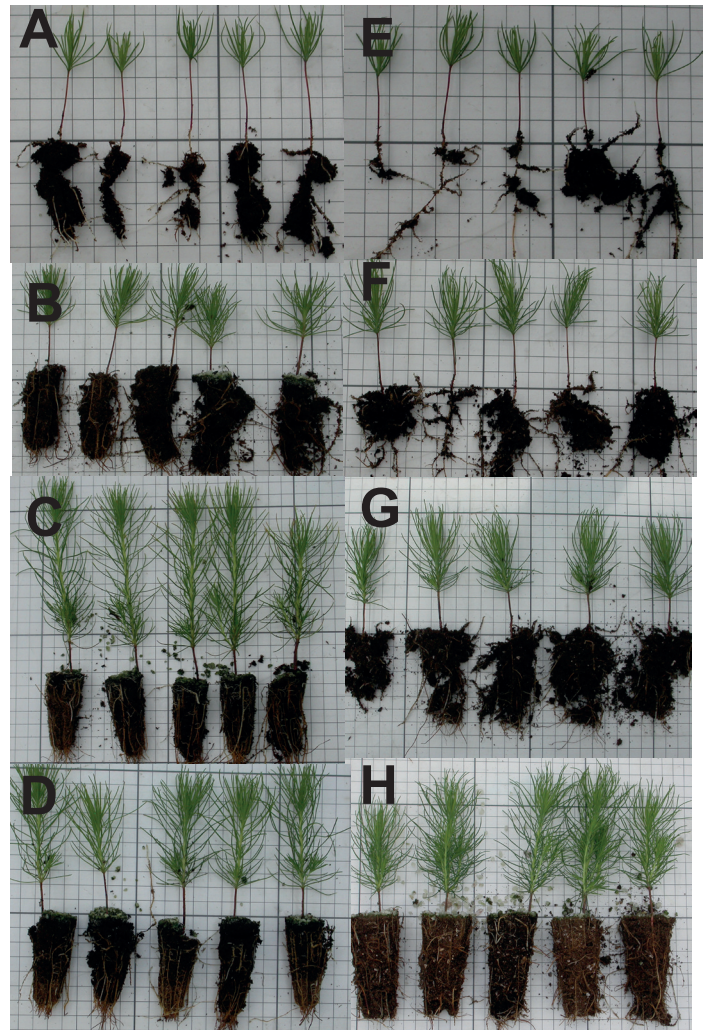


Figure 3. (A-D) Groupes cultivés dans le récipient 113-25 pendant 4, 6, 8 et 10 semaines. (E-H) Groupes cultivés dans le récipient 63-90F pendant 4, 6, 8 et 10 semaines. Un petit carreau représente 1 cm.

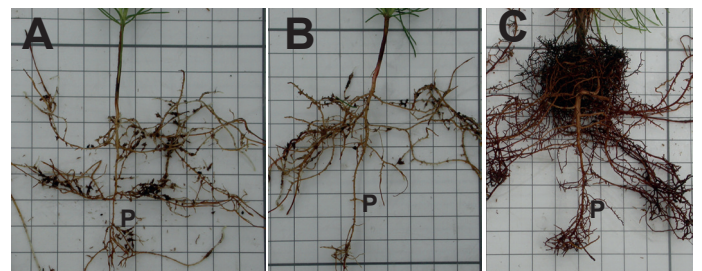


Figure 4. Développement racinaire après 10 semaines (A) en récipient 113-25, (B) en récipient 63-90F et (C) après une saison de culture en récipient 67-50. P: pivot.

Expérience 1 : 113-25 vs 63-90F et date de semis

Le nombre de racines actives après 4 semaines en pot était significativement plus grand chez les plants 63-90F quelques soit l'âge au moment du repotage (Tableau 3A; figure 5A). Par ailleurs, le nombre de racines mesurant plus de 3 cm n'a pas varié significativement entre la 4^{ème} et la 11^{ème} semaine en pot (Tableau 3B). Ces racines étaient plus nombreuses chez les plants 63-90F (Tableau 3B; figure 5B).

Tableau 1. Mesures initiales avant le rempotage des plants cultivés pendant 4, 6, 8 ou 10 semaines en récipients 113-25 et 63-90F ainsi que du lot 1-0 en récipient 67-50.

| Récipient | Âge (sem) | N | Hauteur (cm) | Diamètre (mm) | H/D | N | Pivot | | | Racine Lat.* |
|-----------|-----------|----|--------------|---------------|------------|----|-----------|-----------|---------------|---------------|
| | | | | | | | Cerné (%) | Actif (%) | Longueur (cm) | Longueur (cm) |
| 113-25 | 4 | 36 | 3,4 ± 0,1 | 0,52 ± 0,02 | 6,8 ± 0,6 | 10 | 100 | 100 | 5,3 ± 0,3 | 5,6 ± 0,4 |
| | 6 | 36 | 3,9 ± 0,2 | 0,70 ± 0,04 | 5,6 ± 0,3 | 10 | 100 | 100 | 5,6 ± 0,4 | 8,8 ± 1,2 |
| | 8 | 36 | 4,2 ± 0,2 | 0,89 ± 0,04 | 5,0 ± 0,5 | 10 | 100 | 100 | 5,6 ± 0,3 | 13,3 ± 2,1 |
| | 10 | 36 | 7,1 ± 0,4 | 1,22 ± 0,06 | 5,8 ± 0,3 | 10 | 100 | 90 | 5,4 ± 0,5 | 13,2 ± 1,5 |
| 63-90F | 4 | 36 | 3,1 ± 0,1 | 0,45 ± 0,02 | 7,2 ± 0,5 | 10 | 30 | 100 | 5,4 ± 1,2 | 6,5 ± 1,3 |
| | 6 | 36 | 4,0 ± 0,2 | 0,80 ± 0,04 | 5,1 ± 0,3 | 10 | 100 | 90 | 5,2 ± 1,0 | 10,1 ± 1,3 |
| | 8 | 36 | 5,6 ± 0,3 | 1,19 ± 0,06 | 4,8 ± 0,3 | 10 | 100 | 100 | 6,8 ± 1,4 | 11,3 ± 1,3 |
| | 10 | 36 | 8,3 ± 0,3 | 1,55 ± 0,06 | 5,4 ± 0,2 | 10 | 100 | 100 | 8,2 ± 1,1 | 13,7 ± 1,2 |
| 67-50 | 1+0 | 36 | 29,4 ± 1,4 | 2,90 ± 0,20 | 10,1 ± 0,2 | 10 | 100 | 0 | 8,0 ± 0,4 | 16,1 ± 1,6 |

* longueur de la plus longue racine latérale.

Tableau 2. Modèle linéaire généralisé (GLM) du % de pivot actif lors du rempotage.

| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
|-----------|------|----------|--------------|
| Récipient | 2 | 32,93 | <0,0001 |
| 113 vs 67 | 1 | 21,02 | <0,0001 |
| 113 vs 63 | 1 | 1,44 | 0,2303 |
| 67 vs 63 | 1 | 27,73 | <0,0001 |

Tableau 3. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines actives après 4 semaines en pot. (B) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur après 4 et 11 semaines en pot.

A-) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot.

| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
|---------------|------|----------|--------------|
| Âge (A) | 3 | 217,66 | <0,0001 |
| A lin | 1 | 211,69 | <0,0001 |
| A quad | 1 | 0,10 | 0,7482 |
| A cub | 1 | 1,04 | 0,3077 |
| Récipient (R) | 1 | 60,39 | <0,0001 |
| A x R | 3 | 7,47 | 0,0584 |

B-) Nombre de racines latérales de plus de 3 cm de long.

| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
|---------------|------|----------|--------------|
| Temps (T) | 1 | 0,00 | 0,9761 |
| Âge (A) | 3 | 11,93 | 0,0076 |
| A lin | 1 | 11,18 | 0,0008 |
| A quad | 1 | 0,28 | 0,5943 |
| A cub | 1 | 0,67 | 0,4127 |
| T x A | 3 | 4,64 | 0,2001 |
| Récipient (R) | 1 | 42,89 | <0,0001 |
| T x R | 1 | 0,01 | 0,9190 |
| A x R | 3 | 2,84 | 0,4174 |
| T x A x R | 3 | 5,00 | 0,1719 |

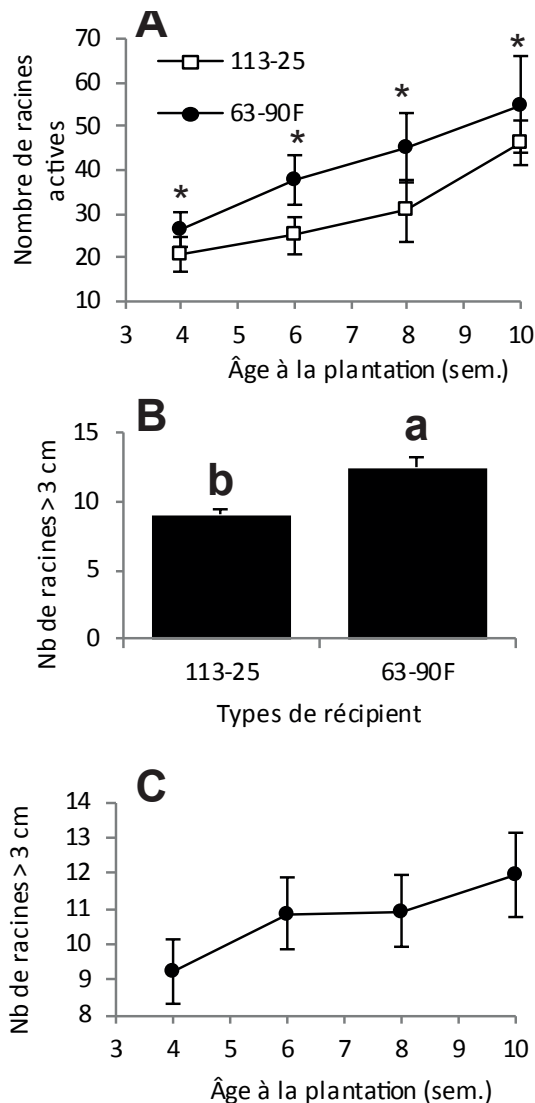


Figure 5. (A) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot en fonction de l'âge à la plantation. (B) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm après 4 ou 11 semaines en pot en fonction du type de récipient. (C) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm après 4 ou 11 semaines en pot en fonction de l'âge à la plantation (moyennes pour les plants 113-25 et 63-90F). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différents à P ≤ 0,05.

Tableau 4. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) sur la présence du pivot et de son origine. (B) % de plants ayant une racine pivotante et % de plants dont le pivot est d'origine primaire.

A-) Sommaire GLM.

| Source | d.l. | Présence du pivot | | Origine du pivot | |
|---------------|------|-------------------|--------------|------------------|--------------|
| | | χ^2 | P > χ^2 | χ^2 | P > χ^2 |
| Temps (T) | 1 | 2,00 | 0,1574 | 2,19 | 0,1392 |
| Âge (A) | 3 | 3,01 | 0,3908 | 3,92 | 0,2701 |
| T x A | 3 | 3,02 | 0,3891 | 6,20 | 0,1022 |
| Récipient (R) | 1 | 2,00 | 0,1574 | 2,19 | 0,1392 |
| T x R | 1 | 2,00 | 0,1574 | 2,19 | 0,1392 |
| A x R | 3 | 3,02 | 0,3891 | 3,55 | 0,3144 |
| T x A x R | 3 | 3,02 | 0,3891 | 3,55 | 0,3144 |

B-) % en fonction du type de récipient x âge x temps

| Temps (sem.) | Récipient | Âge (sem.) | N | Présence du pivot (%) | Pivot d'origine (%) |
|--------------|-----------|------------|----|-----------------------|---------------------|
| 4 | 113-25 | 4 | 10 | 100 | 90 |
| | | 6 | 10 | 100 | 100 |
| | | 8 | 10 | 100 | 100 |
| | | 10 | 10 | 100 | 100 |
| | 63-90F | 4 | 10 | 100 | 90 |
| | | 6 | 10 | 100 | 100 |
| | | 8 | 10 | 100 | 100 |
| | | 10 | 10 | 100 | 100 |
| 11 | 113-25 | 4 | 10 | 100 | 100 |
| | | 6 | 10 | 100 | 100 |
| | | 8 | 10 | 100 | 90 |
| | | 10 | 10 | 90 | 90 |
| | 63-90F | 4 | 10 | 100 | 100 |
| | | 6 | 10 | 100 | 100 |
| | | 8 | 10 | 100 | 100 |
| | | 10 | 10 | 100 | 90 |

L'âge des plants au moment du repotage a eu un impact important sur la production de ces racines, leur nombre augmentant linéairement en fonction de l'âge, quelque soit le type de récipient (Tableau 3B; figure 5C).

Les deux types de semis ne se différenciaient pas en ce qui a trait à la présence du pivot ou à son origine (Tableau 4A). Après 11 semaines en pot, 90-100 % des plants possédaient un pivot d'origine primaire (Tableau 4B). Le nombre de racines pivotantes secondaires augmentaient significativement avec l'âge du plant au moment du repotage (Tableau 5; figure 6A). Le nombre de racines pivotantes était le même pour les deux types de récipient. Par contre, les racines pivotantes des plants 63-90F étaient significativement plus longues que celles des 113-25 pour les deux dates de mesures (Tableau 6; figure 6B).

Après 11 semaines en pot, la hauteur et le diamètre de la tige de même que sa biomasse et celle des racines étaient

Tableau 5. Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines pivotantes secondaires.

| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
|---------------|------|----------|---------------|
| Âge (A) | 3 | 8,28 | 0,0405 |
| A lin | 1 | 7,41 | 0,0065 |
| A quad | 1 | 0,56 | 0,4554 |
| A cub | 1 | 0,80 | 0,3714 |
| Récipient (R) | 1 | 1,29 | 0,2552 |
| A x R | 3 | 1,08 | 0,7816 |

Tableau 6. Sommaire de l'ANOVA de la longueur des racines pivotantes primaires ou secondaires..

| Source | d.l.n | d.l.d | Rapport F | Prob. > F |
|---------------|-------|-------|-----------|---------------|
| Temps (T) | 1 | 15,9 | 21,20 | 0,0003 |
| Âge (A) | 3 | 15,9 | 0,22 | 0,8777 |
| T x A | 3 | 15,9 | 1,30 | 0,3083 |
| Récipient (R) | 1 | 15,9 | 13,05 | 0,0024 |
| T x R | 1 | 15,9 | 0,08 | 0,7803 |
| A x R | 3 | 15,9 | 0,41 | 0,7456 |
| T x A x R | 3 | 15,9 | 0,37 | 0,7758 |

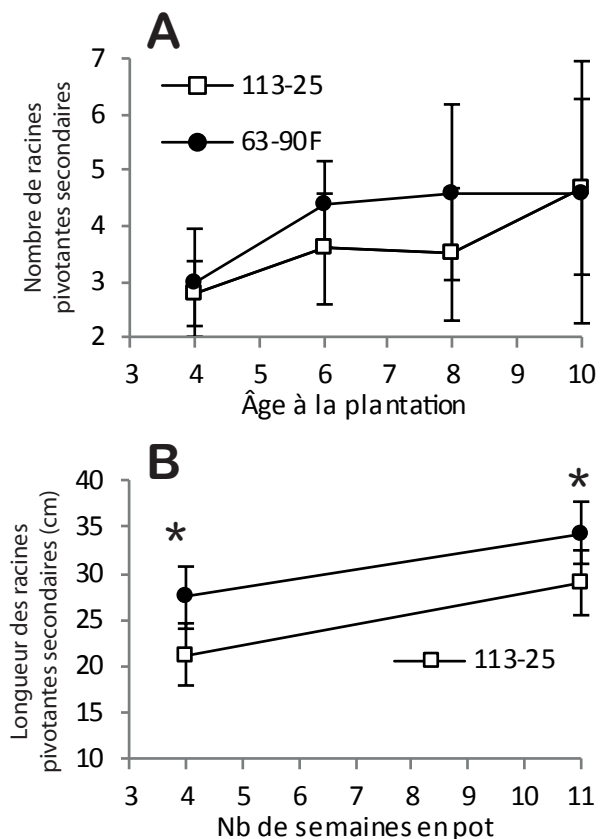
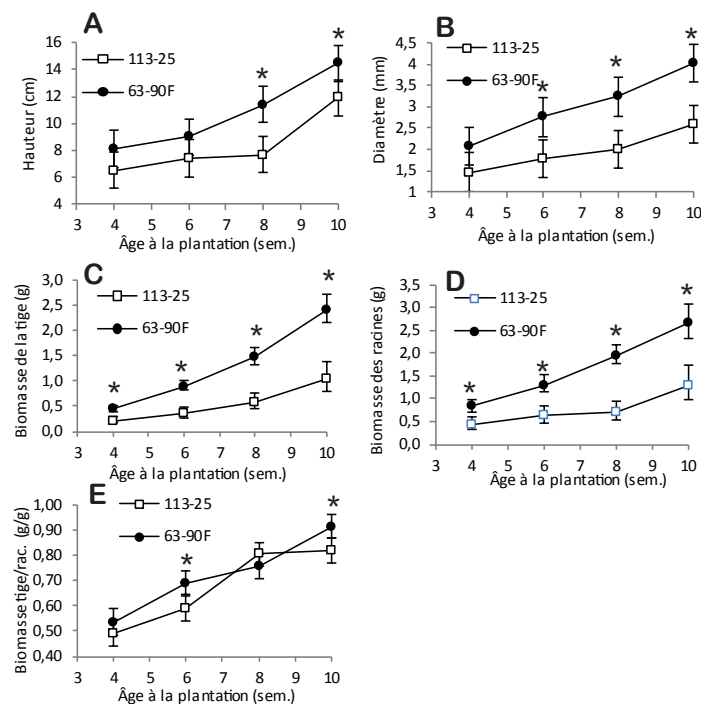


Figure 6. (A) Nombre de racines pivotantes secondaires en fonction de l'âge à la plantation pour les deux types de récipients. (B) Longueur des racines pivotantes secondaires en fonction du nombre de semaines en pot pour les deux types de récipient. *significativement différents à P ≤ 0,05. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

Tableau 7. Sommaire de l'ANOVA des variables morphologiques mesurées 11 semaines après le repotage.

| Source | Hauteur de la tige | | | | Diamètre au collet | | | | Biomasse de la tige* | | | | Biomasse des racines* | | | | Biomasse tige/racines | | | |
|-------------------|--------------------|-------|---------|---------|--------------------|---------|---------|-------|----------------------|---------|---------|--------|-----------------------|---------|---------|-------|-----------------------|---------|---------|--------|
| | d.l.n | d.l.d | Rapport | P > F | d.l.d | Rapport | P > F | F | d.l.d | Rapport | P > F | F | d.l.d | Rapport | P > F | F | d.l.d | Rapport | P > F | F |
| Récepteur (R) | 1 | 8 | 32,58 | 0,0005 | 8 | 60,21 | <0,0001 | 1,00 | 8 | 75,51 | <0,0001 | 1,00 | 8 | 83,01 | <0,0001 | 1,00 | 8 | 307,09 | <0,0001 | 0,0100 |
| Âge (A) | 3 | 8 | 38,91 | <0,0001 | 8 | 22,21 | 0,0003 | 67,78 | 8 | 27,88 | 0,0002 | 202,96 | 8 | 0,07 | 0,7962 | 27,88 | 8 | 1,00 | <0,0001 | 0,0001 |
| A _{lin} | 1 | 8 | 1,00 | <0,0001 | 8 | 65,53 | <0,0001 | 0,10 | 8 | 0,10 | 0,7100 | 0,29 | 8 | 0,54 | 0,4821 | 83,01 | 8 | 1,00 | <0,0001 | 0,2334 |
| A _{quad} | 1 | 8 | 1,00 | 0,0108 | 8 | 0,50 | 0,4984 | 0,37 | 8 | 0,37 | 0,7774 | 0,54 | 8 | 0,81 | 0,5226 | 0,07 | 8 | 1,00 | 0,2334 | 0,3431 |
| A _{cub} | 1 | 8 | 0,99 | 0,3492 | 8 | 0,59 | 0,4657 | 0,29 | 8 | 0,29 | 0,6024 | 0,54 | 8 | 0,81 | 0,5226 | 0,54 | 8 | 1,00 | 0,3431 | 0,0253 |
| R x A | 3 | 8 | 1,00 | 0,2997 | 8 | 1,00 | 0,2658 | 0,37 | 8 | 0,37 | 0,7774 | 0,29 | 8 | 0,81 | 0,5226 | 0,54 | 8 | 1,00 | 0,0253 | 0,2073 |
| A = 4 | 1 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,0091 |
| A = 6 | 1 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,1531 |
| A = 8 | 1 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,0130 |
| A = 10 | 1 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

* ces variables ont été transformées en log naturel avant l'analyse.

Figure 7. Variables morphologiques mesurées 11 semaines après la plantation. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. * significativement différents à $P \leq 0,05$.

significativement plus élevés chez les plants 63-90F comparativement aux plants 113-25 (Tableau 7). Même si l'écart entre les deux types de plant semblait augmenter avec l'âge des plants, les interactions $R \times A$ n'étaient pas significatives (Tableau 7; figure 7 A-B-C-D). L'interaction $R \times A$ était significative pour le rapport tige/racines. Ce rapport était significativement plus élevés chez les semis 63-90F transplantés après 6 ou 10 semaines en récipient (Tableau 7; figure 7E).

Expérience 2 : 113-25 vs 63-90F et 67-50

Le nombre de racines actives dénombrées après 4 semaines en pot était significativement plus faible chez les plants 67-50, les plants 63-90F en possédant le plus (Tableau 8A; figure 8A). Le nombre de racines de plus de 3 cm de longueur a crû très légèrement entre la 4^{ème} et la 11^{ème} semaine en pot (Tableau 8B). Ce nombre était significativement plus grand chez les plants 63-90F (Tableau 8B; figure 8B). Le système racinaire se caractérisait par la présence d'un court pivot primaire se ramifiant en quelques pivots secondaires très longs portant quelques racines latérales secondaires très courtes (Figure 9). La majorité des racines latérales primaires prenaient leur origine près de la surface.

Le pourcentage de plants possédant un pivot après 11 semaines en pot était significativement plus élevé chez les

Tableau 8. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines actives après 4 semaines en pot et (B) du nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de longueur après 4 et 11 semaines en pot.

| A-) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot. | | | |
|--|------|----------|-----------------|
| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
| Récipient (R) | 2 | 35,09 | < 0,0001 |
| 113 vs 67 | 1 | 9,99 | 0,0016 |
| 113 vs 63 | 1 | 7,68 | 0,0056 |
| 63 vs 67 | 1 | 35,09 | < 0,0001 |
| B-) Nombre de racines secondaires de plus de 3 cm de long. | | | |
| Source | d.l. | χ^2 | P > χ^2 |
| Récipient (R) | 2 | 27,23 | < 0,0001 |
| 113 vs 67 | 1 | 0,57 | 0,4515 |
| 113 vs 63 | 1 | 16,46 | < 0,0001 |
| 63 vs 67 | 1 | 22,92 | < 0,0001 |
| Temps (T) | 1 | 8,79 | 0,0030 |
| R x T | 2 | 3,43 | 0,1799 |

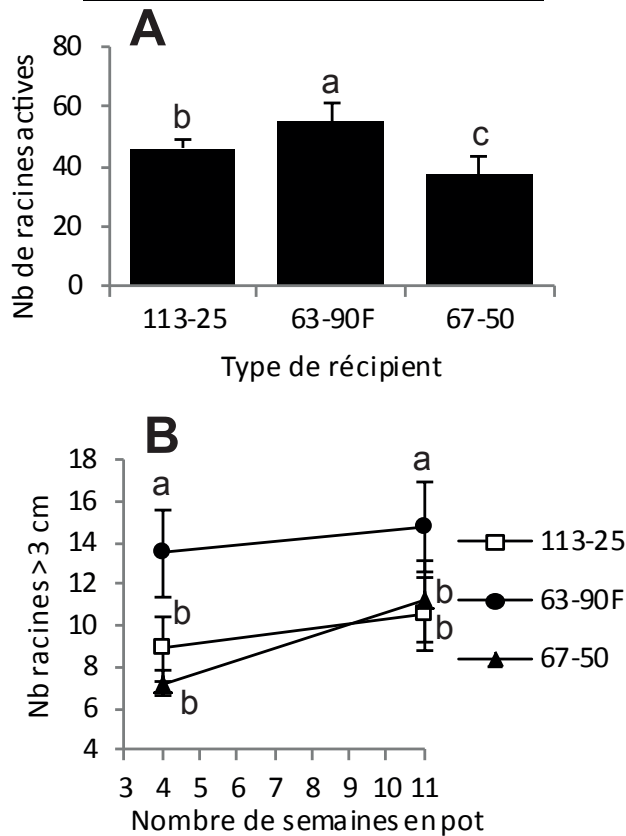


Figure 8. (A) Nombre de racines actives après 4 semaines en pot en fonction du type de réceptier. (B) Nombre de racines mesurant plus de 3 cm de longueur en fonction du nombre de semaines en pot. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

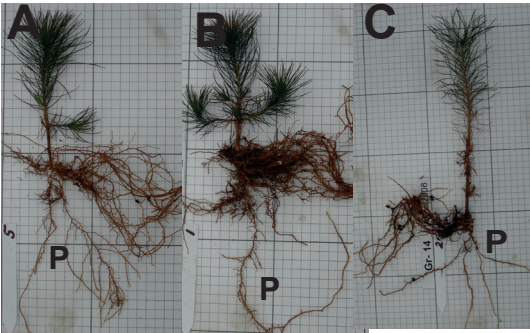


Figure 9. Développement racinaire après 11 semaines en pot d'un plant cultivé (A) en réceptier 113-25 pendant 10 semaines, (B) en réceptier 63-90F pendant 10 semaines et (C) en réceptier 67-50 (1+0). P : pivot.

Tableau 9. Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) sur la présence du pivot et de son origine.

| Source | d.l. | Présence du pivot | | Origine du pivot | |
|---------------|------|-------------------|--------------|------------------|--------------|
| | | χ^2 | $P > \chi^2$ | χ^2 | $P > \chi^2$ |
| Réceptier (R) | 2 | 14,07 | 0,0009 | 10,85 | 0,0044 |
| 113 vs 67 | 1 | 7,22 | 0,0072 | 7,22 | 0,0072 |
| 113 vs 63 | 1 | 0,00 | 0,9957 | 0,00 | 1,0000 |
| 63 vs 67 | 1 | 11,07 | 0,0009 | 7,22 | 0,0072 |
| Temps (T) | 1 | 0,00 | 0,9972 | 3,10 | 0,0784 |
| R x T | 2 | 0,93 | 0,6296 | 1,68 | 0,4322 |

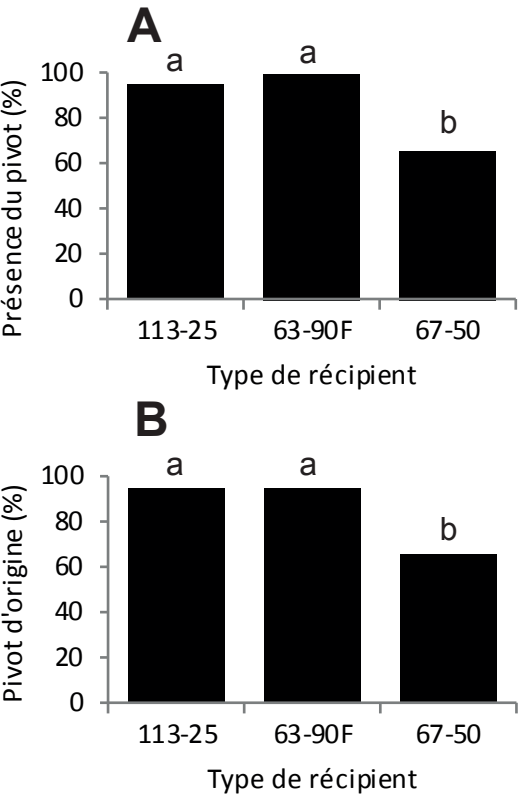


Figure 10. (A) Pourcentage de semis de pin gris possédant un pivot en fonction des types de réceptier. (B) Pourcentage de semis de pin gris possédant un pivot d'origine primaire en fonction du type de réceptier. Les pourcentages surmontés de lettres différentes sont différents à $P \leq 0,05$.

Tableau 10. (A) Sommaire du modèle linéaire généralisé (GLM) du nombre de racines pivotantes 11 semaines après le rempotage et (B) sommaire de l'ANOVA de la longueur du pivot principal 4 et 11 semaines après le rempotage.

| | | | |
|-----------------------------------|------|----------|--------------|
| A-) Nombre de racines pivotantes. | | | |
| Source | d.l. | χ^2 | $P > \chi^2$ |
| Récipient (R) | 2 | 3,53 | 0,1711 |

| | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|-----------|---------------|
| B-) Longueur du pivot principal. | | | | |
| Source | d.l.n. | d.l.d. | Rapport F | $P > F$ |
| Récipient (R) | 2 | 6 | 7,00 | 0,0270 |
| Temps (T) | 1 | 6 | 6,97 | 0,0385 |
| T x R | 2 | 6 | 0,47 | 0,6469 |

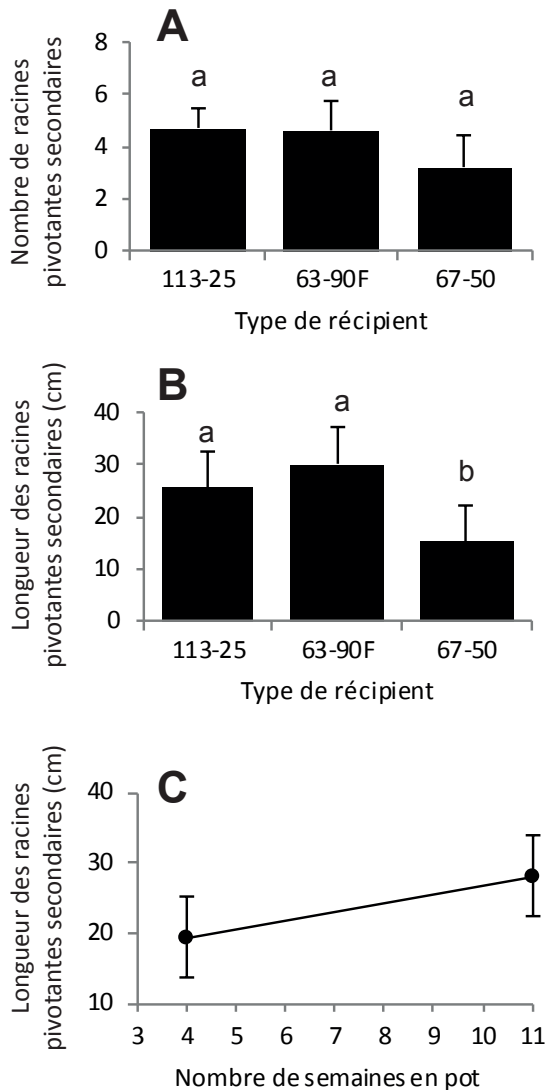


Figure 11. (A) Nombre de racines pivotantes secondaires en fonction du type de récepteur. (B) Longueur des pivots secondaires en fonction du type de récepteur. (C) Longueur des pivots secondaires en fonction du nombre de semaines en pot. Les moyennes surmontées de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

Tableau 11. Sommaire de l'ANOVA de l'effet du récepteur sur les variables morphologique mesurées 11 semaines après le rempotage.

| | | | | |
|----------------------|-------|-------|-----------|---------|
| Variables | d.l.n | d.l.d | Rapport F | $P > F$ |
| Hauteur | 2 | 3 | 304,30 | 0,0003 |
| Diamètre | 2 | 3 | 24,39 | 0,0139 |
| Biomasse de la tige | 2 | 3 | 60,71 | 0,0037 |
| Biomasse des racines | 2 | 3 | 68,90 | 0,0031 |
| Biomasse tige/rac. | 2 | 3 | 94,95 | 0,0019 |

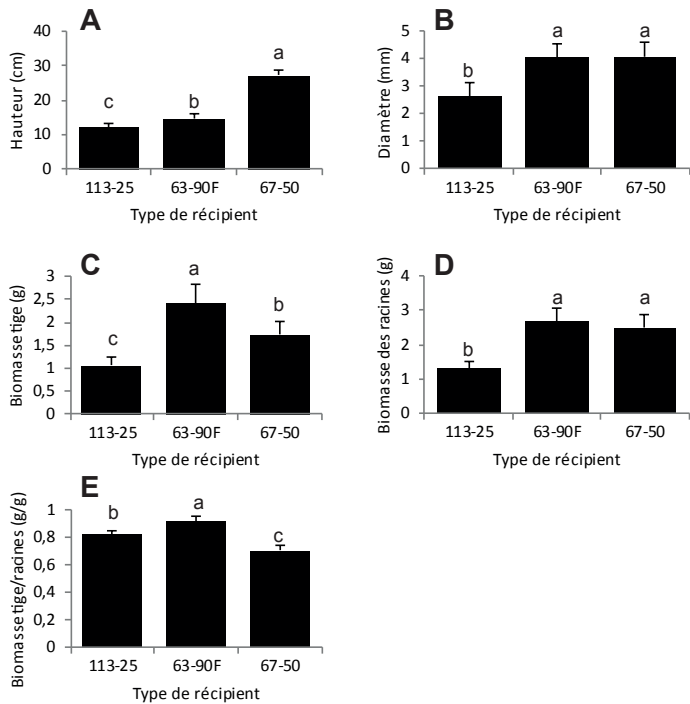


Figure 12. Effet du type de récepteur sur les différents paramètres de croissance des semis de pin gris, 11 semaines après le rempotage. Les moyennes surmontées d'une lettre différente sont significativement différentes à $P \leq 0,05$. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.

113-25 et les 63-90F comparativement aux 67-50 (Tableau 9). Seulement 65% des plants qui ont été cultivés en 67-50 avaient un pivot viable après 11 semaines en pot comparativement à plus de 95% des cas chez les deux autres types de plant (Figure 10A). Dans 95% des cas, le pivot était d'origine primaire chez les plants 113-25 et 63-90F et secondaire dans 35% des cas pour les plants 67-50 (Figure 10B). Le nombre de racines pivotantes secondaires ne variait pas entre les différents types de plants (Tableau 11A), soit 3-4 en moyenne (Figure 11A). Les pivots des plants 113-25 et 63-90F étaient significativement plus longs que ceux des 67-50 (Tableau 10B; figure 11B) et en moyenne, l'allongement des pivots secondaires de tous les plants se chiffrait à 8,8 cm entre la 4^{ème} et la 11^{ème} semaine en pot (Figure 11C).

Après 11 semaines en pot, les plants provenant des récipients 113-25, 63-90F et 67-50 se différencient significativement entre eux au niveau de la hauteur et du diamètre de la tige, des biomasses de la tige et des racines de même que du rapport tige/racines (Tableau 11). La tige des 67-50 était nettement plus haute que celle des deux autres types de plants mais le 63-90F avait un diamètre aussi gros que celui des 67-50 (Figure 11A-B). D'ailleurs, la biomasse de la tige des 63-90F était significativement plus grande que celle des 67-50, les 113-25 avaient la biomasse la plus faible (Figure 11C). La biomasse racinaire des 63-90F et des 67-50 était le double de celle des 113-25 (Figure 8D). Le rapport tige/racine était le plus bas chez les 67-50 suivis des 113-25 (Figure 11E).

DISCUSSION

Dix semaines de culture en récipient 113-25 n'ont pas été suffisantes pour que les plants atteignent une hauteur commerciale pour ce type de récipient. Une taille minimale de 10 cm est nécessaire pour que les plants de pin gris soient classés dans la catégorie A pour ce type de production (MRNF 2011). Pour les récipients de 110 cc, la taille est de 18 cm. On note cependant une bonne cohésion de la carotte de tourbe entourant les racines à partir de la 10^{ième} semaine de culture en récipient même si quelques semaines de plus auraient été nécessaires pour rencontrer le critère 01 du MRNF (MRNF 2011). Les plants cultivés dans le récipient 63-90F avaient une taille et un diamètre plus élevés que leurs homologues en 113-25. Cela indique qu'à partir de la 8^{ième} semaine, les dimensions du récipient 113-25 imposent des contraintes à la croissance de la partie épicée du plant. Chez le pin lodgepole, la croissance de la biomasse épicée et racinaire est inhibée à partir de la 8^{ième} semaine de culture pour des volumes de cavités de 23 cc (Landis 1990). Les essences intolérantes à l'ombre comme le pin des marais (*Pinus palustris* Mill.) poussent définitivement mieux dans les récipients de cavités plus grandes tandis que des espèces plus tolérantes peuvent être produites à des densités plus fortes (Landis 1990). Le pin gris est reconnu comme une espèce intolérante à l'ombre (Rudolph et Burns 1983) et sa croissance subirait les contrechocs d'une densité de culture élevée pendant une période de temps trop longue. Lorsqu'on diminue la densité de culture, le rapport biomasse tige/racines est généralement moins élevé et la carotte est plus ferme, ayant une densité racinaire élevée (Salonius et al. 2000). Chez l'épinette noire, la hauteur à la fin de la pé-

riode de culture normale en serre augmente en fonction du rapport des surfaces alvéole/espace total autour du plant, jusqu'à un maximum de 0,4; au-delà de cette valeur il n'y a pas de gain en allouant une plus grande surface d'alvéole p/r à la surface de culture (Salonius et al. 2000). Les récipients avec le volume de cavité le plus grand produisent des plants dont la hauteur et le diamètre sont les plus élevés pour une même période de culture (Dominguez-Lerena et al. 2006). Parmi les variables qui influencent la croissance, le diamètre de la cavité est nettement plus important que la hauteur de celle-ci et un rapport hauteur/diamètre de l'alvéole autour de 4 serait optimal, du moins pour la culture de *Pinus taeda* (Dominguez-Lerena et al. 2006). Carlson et Endean (1976) suggèrent plutôt un rapport de 3 :1 pour les très petits volumes (\cong 10 cc) et de 1 :1 pour les plus grands volumes (33-524 cc). Les récipients avec un petit diamètre et une hauteur élevée produisent des plants de piètre qualité (Marien et Drovin 1978) dans (Dominguez-Lerena et al. 2006). Ce rapport est de 2,8 pour les alvéoles des récipients 113-25 et 67-50 et de 2,1 pour les 63-90F; donc le 63-90F a des alvéoles qui se rapprochent le plus de l'optimum.

Le pivot des plants 113-25 et 63-90F, même s'il a été cerné à partir de la 4^{ième} semaine de culture en récipient, possédait un méristème actif dans la grande majorité des cas. Le méristème actif était totalement absent chez le pivot des plants 67-50 1+0. Notre hypothèse est donc confirmée; le pivot a plus de chance de mourir si on prolonge le temps de résidence en récipient. Cependant, des études supplémentaires seraient nécessaires pour voir si une durée de culture en récipient 113-25 ou 63-90F plus longue que 10 semaines afin d'atteindre la taille commerciale voulue permettrait de conserver un pivot viable. La profondeur de l'alvéole a influencé la longueur du pivot puisque celui-ci est plus long dans les récipients 63-90F et 67-50 comparativement aux 113-25. On remarque aussi dans le cas des plants 63-90F, des racines latérales très longues ce qui indique que les ouvertures du récipient ajouré ne sont pas efficaces à 100% pour cerner les racines et qu'il y a eu spiralisation de celles-ci. Le pin gris produit trois fois plus de racines spiralées que l'épinette noire ou blanche (Landis 1990). Les pins gris cultivés dans le récipient à parois ajourées de 50 cc Starpot ne produisent pas de racines plongeantes (Colombo et Chapman 2005, Chapman et Colombo 2006); le système racinaire produit dans ce type de récipient serait comparable à celui obtenu par un cernage au cuivre. Gingras et Richard (1999) ont obtenu pour leur part des plants équilibrés d'épinette noire, d'épinette blanche, d'épinette de

Norvège, de mélèze laricin et de pin rouge dans le récipient 63-90F; ce récipient selon ces auteurs permet de produire de façon naturelle des systèmes racinaires peu déformés avec une bonne proportion de racines horizontales. Eux aussi notent cependant la présence de racines non cernées qui poursuivent leur croissance vers le bas où le cernage se produit au niveau du trou de drainage. Les déformations sont observées dans le haut de la cavité où il n'y a pas de fentes (Gingras 1993). La biomasse des racines à la fin de la culture en récipient (non mesurée dans notre expérience) est cependant beaucoup plus petite chez les plants cultivés dans des récipients à parois ajourées (Rune 2003).

La morphologie du système racinaire des deux types de plants 113-25 et 63-90F était exempte de déformation. Elle s'apparentait à la forme en échelle («ladder») dans la partie inférieure de la motte de tourbe et de racines plongeantes («sinker») dans le haut, tel que décrites par Colombo et Chapman (2005) et Chapman et Colombo (2006). Ce type de système racinaire en échelle se caractérise par un pivot central d'où irradiant des racines latérales disposées symétriquement et à égale distance du pivot; les racines plongeantes sont identiques à celles en échelle sauf qu'elles sont déformées vers le bas au contact de la paroi.

Après 11 semaines en pot, la hauteur et le diamètre de la tige de même que les biomasses de la tige et des racines augmentaient en fonction du temps de culture en récipient. Les plants cultivés en 63-90F étaient plus haut et plus gros que ceux cultivés en 113-25 pour le même temps de culture. Cet écart augmentait avec le temps de culture même si l'interaction Récipient x Âge n'était pas significative. Il faut spécifier que le volume des pots dans lesquels les plants 63-90F ont été repiqués était plus grand que celui des 113-25; la différence de croissance pourrait alors s'expliquer, du moins en partie, par une plus forte compétition intra-spécifique des 113-25. De plus, lors de la culture en récipient, les plants 63-90F ont bénéficiés d'une fertilisation azotée beaucoup plus importante que les 113-25 pour atteindre une consommation de luxe tel que définit par Timmer (1996). Dans une telle situation, l'azote en excès par rapport aux besoins du plant est stocké et peut être utilisée plus tard pour supporter la croissance durant les périodes où l'azote est facteur limitant (Chapin 1980). Le petit écart au moment du repotage s'est matérialisé en un gain de croissance appréciable pour les 63-90F après 11 semaines en pot qui n'ont pas été fertilisés après le repiquage. Ceci s'explique par le fait que la croissance de la biomasse est exponentielle, un petit écart au début de la période de croissance tend à s'accroître

avec le temps (Causton et Venus 1981). Dans un dispositif expérimental implanté en forêt boréale, les plants de pin gris cultivés en récipient 126-25 demeuraient significativement plus petits que ceux cultivés en 67-50 trois ans après la plantation (Walsh et Lord 2005). De même, les caractères morphologiques plus imposants des PFD d'épinette noire au moment de la mise en terre leur procurent un meilleur potentiel de croissance que les plants de dimensions standard en plantation (Roy et al. 2003). Par contre, Walsh et al. (2011) ont montré que l'écart de croissance entre les plants d'épinette noire cultivés en récipient 126-25 et 67-50 tend à s'estomper après 10 ans en plantation. Quoiqu'il en soit, le temps de culture devrait être supérieur à 10 semaines pour obtenir un plant de taille commercialisable. On devrait s'attendre à ce que les plants cultivés en 63-90F soit plus gros que ceux en 113-25 pour la même période de culture.

Cependant, le fait le plus important de l'expérience comparant les plants cultivés en récipient 113-25 à ceux en 63-90F à différents stades de développement est que les plants de pin gris ont conservé leur pivot, lequel a gardé sa capacité de croître après la plantation en formant des pivots secondaires à l'extrémité du pivot primaire qui a pourtant été cerné pendant la période de culture en récipient. Ordinairement, lorsque le pivot avorte, une racine latérale de deuxième ordre prend la place du pivot (Burdett 1978). Chez l'hévéa, le blocage du pivot entraîne chez le système racinaire diverses modifications morphogénétiques tel que la ramification dans la zone apicale du pivot et l'ortho géotropisme des racines secondaires (Roux et Pagès 2000). Cette ramification du pivot juvénile est fréquente chez le chêne (Pagès et Serra 1994). Elle a aussi été observée chez les pins gris en bas âge se régénérant après feu sur des sites xériques (Sims 1964). Le pivot non bloqué constitue l'axe dominant du système racinaire et constitue le puit majeur au niveau des racines, monopolisant l'essentiel des substances nutritives et hormonales disponibles. Le blocage du pivot conduit à lever sa dominance en permettant une redistribution des ressources dans les axes restants ou se mettant en place ultérieurement (Roux et Pagès 2000). Le temps de résidence limité dans le récipient, soit un maximum de 10 semaines dans le cas de notre expérience, explique sans doute la capacité de régénération du pivot. Il est reconnu que plus le plant est jeune au moment de la plantation, moins les déformations racinaires sont importantes (Harris 1978, Sutton 1980). Dès la 4^{ième} semaine de culture en récipient, le pivot avait atteint l'extrémité inférieure de la cavité et était cerné au contact de l'air; le méristème du pivot demeurait cepen-

dant actif dans plus de 90% des cas. Dans le cas du lot 1+0 cultivé en récipient 67-50, on remarque l'absence totale de méristème actif du pivot, probablement à cause du temps de résidence prolongé en récipient.

Après 11 semaines de culture en pot, on remarque la prolifération de racines latérales qui prenaient leur origine dans la portion supérieure du système racinaire ainsi que l'allongement du pivot primaire ou de quelques pivots secondaires. D'après Burdett et al. (1986), les semis qui ont été cultivés quelques semaines seulement en récipient conservent la capacité d'initier des racines latérales de premier ordre; après la plantation, les semis mettent en place un système formé de racines latérales primaires qui n'a pas été affecté lors de la culture en récipient. Un système racinaire adéquat à la fin de la période de culture est important pour l'installation des semis après la plantation puisque le système racinaire permanent s'établit durant les toutes premières années en plantation (Coutts et Lewis 1983). La racine pivotante joue un rôle très important dans la stabilité du plant en lui servant d'ancrage (Danjon et al. 1999, Danjon et al. 2005). Lorsque l'arbre vieillit, l'ancrage verticale est renforcé par des racines plongeantes («sinker-roots») dont le volume peut atteindre chez les arbres matures 3 fois le volume du pivot primaire, l'ensemble contribuant à la rigidité de la plaque de sol contenant les racines, assurant du même coup la stabilité de l'arbre (Danjon et al. 2005).

Le nombre de pivots ne variait pas significativement entre les deux types de récipient, soit 3 pour les plants cultivés pendant quatre semaines en récipient et 4 en moyennes pour les plants plus âgés. Par contre, la croissance en longueur du pivot était significativement plus forte chez les plants 63-90F. Cet effet est peu marqué mais pourrait contribuer dans une plantation en forêt au maintien du pivot. Le nombre de racines actives et le nombre de racines de plus de 3 cm étaient significativement plus grands chez les plants 63-90F. Des racines plus longues constituent un avantage pour les plants reboisés en forêt puisqu'ils peuvent explorer une plus grande surface du sol forestier pour combler leurs besoins en eau et en minéraux. Les racines pivotantes des semis de pin gris installés après feu sur un sol sablonneux profond poussent en moyenne de 100 à 300 mm par année et le développement du système racinaire les premières années est confiné à la croissance du pivot; ce n'est que 5 ans après la germination qu'on remarque le développement extensif des racines latérales peu profondes (Sims 1964).

Dans l'expérience 2 comparant les plants des récipients

113-25, 63-90F et 67-50, le fait le plus marquant est la croissance très rapide en l'espace de 11 semaines en pot des plants 63-90F qui ont égalé ou dépassé en biomasse les plants 67-50 1+0 qui étaient pourtant beaucoup plus gros au début de l'expérience. Une plus faible proportion de plants 67-50 possédait un pivot et ces pivots étaient d'origine secondaire dans une plus grande proportion. La croissance en longueur du pivot était moindre dans le cas des 67-50. Règle générale, la croissance racinaire était nettement meilleure chez les plants 63-90F. Les récipients de plus grand volume produisent des plants plus grands en pépinière mais aussi après trois ans en plantation (Dominguez-Lerena et al. 2006). Les plants plus gros sont avantagés puisqu'ils peuvent explorer un plus grand volume de sol (Dominguez-Lerena et al. 2006).

Notre hypothèse de départ a pu être validée, soit le fait que les plants cultivés dans le récipient 113-25 et en 63-90F conservent dans la très grande majorité des cas un pivot viable pouvant continuer à croître après la plantation du semis. L'effet de la morphologie du système racinaire sur la croissance en plantation doit être étudié sur le long terme par des expérimentations dans des sites forestiers, puisque les tests en laboratoire, même s'ils permettent de mieux contrôler les variables environnementales, ne reflètent pas réellement les conditions d'un site forestier (Chapman et Colombo 2006). De plus, les substrats organiques comme celui utilisé dans notre expérience ne sont pas les substrats de prédilection pour le développement des racines (Krasowski 2003). La résistance mécanique à la pénétration des racines est plus importante sur les sols minéraux. Des essais sur un site forestier sont en cours présentement pour confirmer nos résultats obtenus dans l'expérimentation en pot.

CONCLUSION

Un minimum de 10 semaines de croissance en récipient est nécessaire pour former une motte racinaire suffisamment dense pour que celle-ci puisse être manipulée sans se briser. Un pivot actif est présent chez plus de 90% des plants cultivée en récipients 113-25 ou 63-90F. Par contre, les plants cultivés dans le récipient 67-50 (1+0) n'ont pas de pivot actif. Les plants cultivés dans le récipient 63-90F ont une meilleure croissance comparativement à ceux cultivés en 67-50. Le fait de prolonger la durée de culture en récipient 113-25 ou 63-90F de 4 à 10 semaines n'influait pas la viabilité du pivot mais la croissance en longueur était plus

rapide dans ce dernier cas. La culture en récipient 63-90F serait une alternative intéressante à celle en 67-50 dans l'optique d'obtenir des plants sans déformation racinaire tout en favorisant la présence d'un pivot viable; ce gain potentiel se ferait cependant au détriment de la densité de culture qui passe de 853 plants/m² dans le cas du 67-50 à 534 plants/m² pour la culture en 63-90F. Il existe un récipient à parois ajourées dont le volume de la cavité est de 50 cc et qui est fabriqué par Lännen Tehtaat Oyj (2012) soit le récipient Plantek PL121F; la densité de culture est légèrement plus basse que celle des 67-50, soit 820 plants/m². Il serait intéressant de vérifier si nos conclusions s'appliquent aussi à un récipient à parois ajourées de plus petites dimensions. La culture du pin gris en récipient 113-25 demeure tout de même l'option la plus économique en fait de densité de culture et de coût de transport. Mais des études plus poussées seraient nécessaires pour confirmer que le pivot reste viable dans le cas d'une culture 1+0, et la plantation en forêt serait tout aussi nécessaire pour confirmer ces premiers résultats.

RÉFÉRENCES

- Balisky, A. C., P. Salonijs, C. Walli et D. Brinkman. 1995. Seedling roots and forest floor: misplaced neglected aspects of British-Columbia's reforestation effort ? *For. Chron.* **71**:59-65.
- Bergeron, O., M. S. Lamhamedi, H. A. Margolis, P.-Y. Bernier et D. C. Stowe. 2004. Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-slit containers. *Hortscience* **39**:599-605.
- Burdett, A. N. 1978. Control of root morphogenesis for improved mechanical stability in container-grown lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* **8**:483-486.
- Burdett, A. N., P. A. F. Martin, H. Coates et R. Eremko. 1986. Toppling in British Columbia's Lodgepole pine plantations: significance, cause and prevention. *For. Chron.* **62**:433-439.
- Carlson, L. W. et F. Endean. 1976. The effect of rooting volume and container configuration on the early growth of white spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* **6**:221-224.
- Carlson, L. W. et L. D. Nairn. 1977. Root deformities in some container-grown jack pine in southeastern Manitoba. *For. Chron.* **53**:147-149.
- Causton, D. R. et J. C. Venus. 1981. The biometry of plant growth. Edward Arnold, London.
- Chapin, F. S. III. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **11**: 233-260.
- Chapman, K. A. et S. J. Colombo. 2006. Early root morphology of jack pine seedlings grown in different types of container. *Scand. J. For. Res.* **21**:372-379.
- Colombo, S. J. et K. A. Chapman. 2005. Root form of jack pine seedlings grown in a variety of containers. Forest Research Information Paper, Ontario Forest Research Institute **160**:84.
- Coutts, M. P. et G. J. Lewis. 1983. When is the structural root system determined in sitka spruce? *Plant Soil* **71**:155-160.
- Danjon, F., T. Fourcaud et D. Bert. 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* **168**:387-400.
- Danjon, F., H. Sinoquet, C. Godin, F. Colin et M. Drexhage. 1999. Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. *Plant and Soil* **211**:241-258.
- Dominguez-Lerena, S., N. H. Sierra, I. C. Manzano, L. O. Bueno, J. L. P. Rubira et J. G. Mexal. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *For. Ecol. Manage.* **221**:63-71.
- Dupuy, L., T. Fourcaud et A. Stokes. 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil* **278**:119-134.
- Gauthier, S., Y. Bergeron et J.-P. Simon. 1993. Cone serotiny in jack pine: ontogenetic, positional, and environmental effects. *Can. J. For. Res.* **23**:394-401.
- Gingras, B. M. 1993. Bilan provisoire des essais expérimentaux réalisés avec des récipients à parois ajourées. Québec Min. For. Note de rech. for. no. 56, Ste-Foy, Québec.
- Gingras, B. M. et S. Richard. 1999. Bilan du développement des récipients à parois ajourées: culture des semis en pépinière et performance en plantation comparative. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy (Québec)
- Gingras, B. M., S. Richard et N. Robert. 2002. Performance de cinq ans en plantations comparatives de plants résineux de fortes dimensions et de feuillus cultivés dans des récipients à parois ajourées. Direction de la Recherche Forestière, Ministère des Ressources Naturelles; Mémoire de recherche forestière, No. 141, Sainte-Foy, Québec.
- Harris, R. W. 1978. Root development of nursery-grown landscape trees. Pages 287-291. *Dans* Root form of

- planted trees. BC Min. For/ Can. For. Serv., Victoria, BC, Canada.
- Kirk, R., E. 1982. Experimental design : procedures for the behavioral sciences. 2nd ed.. Brooks/Cole, Belmont, Calif.
- Krasowski, M. J. 2003. Root system modifications by nursery culture reflect on post-planting growth and development of coniferous seedlings. *For. Chron.* **79**:882-891.
- Lamhamedi, M., G. Lambany, M. Renaud, L. Veilleux, H. Margolis et P. Y. Bernier. 2001. Growth, physiology, and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Can. J. For. Res.* **31**:1968-1980.
- Lamhamedi, M. S., H. Margolis, M. Renaud, L. Veilleux et I. Auger. 2003. Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1+0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière. *Can. J. For. Res.* **33**:279-291.
- Landis, T. D. 1990. Containers : types and functions. Pages 1-39. *Dans* T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald et J. P. Barnett, editors. The container tree nursery manual. USDA For. Serv., Washington, DC.
- Landis, T. D. 2005. Sideslit or airslit containers. *Forest Nursery Notes* **Summer**:17-19.
- Landis, T. D. et D. Willis. 2008. Mechanical root pruning in container nurseries. *Forest Nursery Notes* **Winter**:16-18.
- Lord, D., J. Allaire, D. Walsh et D. Gagnon. 2011. Développement d'une régie de culture en récipient 113-25 adapté au pin gris. UQAC, Chicoutimi, Qc, Canada.
- Marien, J. N. et G. Drouin. 1978. Études sur les conteneurs à parois rigides. *Rapp. Annu. Assoc. For. Cellul.* **1977**: 137-161.
- Marquestaut, J. 1978. Les dangers cachés des plants en conteneurs. *Annales de Recherches Sylvicoles de l'AFOCEL* **1978**: 35-45.
- Montgomery, D. C. 1984. Design and analysis of experiments. J. Wiley New York/Toronto.
- MRNF. 2010. Ressources et industries forestières portrait statistique édition 2010. Gouv. du Québec, Min. des Res. nat. et de la Faune, Ste-Foy, Québec.
- MRNF. 2011. Guide terrain Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en récipients. Gouv. du Québec, Min. des Res. nat. et de la Faune, Ste-Foy, Québec.
- Nichols, T. J. et A. A. Alm. 1983. Root development of container-reared, nursery-grown, and naturally regenerated pine seedlings. *Can. J. For. Res.* **13**:239-245.
- Obenchain, A. M. 2003. Do Ontario's jack pine plantations have stability problem ? *Insights* **6**:7-8.
- Pagès, L. et V. Serra. 1994. Growth and branching of the taproot of young oak trees — a dynamic study. *J. Exp. Bot.* **45**:1327-1334.
- Plourde, A., C. Krause et D. Lord. 2009. Spatial distribution, architecture, and development of the root system of *Pinus banksiana* Lamb. in natural and planted stands. *For. Ecol. and Manage.* **258**:2143-2152.
- Roux, Y. L. et L. Pagès. 2000. Modifications expérimentales de la morphogenèse du système racinaire de jeunes semis d'hévéa (*Hevea brasiliensis*). *Can. J. Bot.* **78**:1460-1468.
- Roy, V., N. Thiffault et R. Jobidon. 2003. Maîtrise intégrée de la végétation au Québec (Canada): une alternative efficace aux phytocides chimiques. Note de recherche forestière no. 123. Gouv. du Québec, Dir. rech. for., Ste-Foy, Québec.
- Rudolph, T. D. et R. M. Burns. 1983. Jack Pine. Pages 92-95. *Dans* R. M. Burns et B. H. Honkala, editors. Silvics of North America. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fen.* **37**:333-342.
- Salonius, P., K. Beaton et B. Roze. 2000. Effects of cell size and spacing on root density and field performance of container-reared black spruce. Atlantic Forestry Centre, Canadian Forest Service; Information Report, no. M-X-208E, Fredericton, N-B, Canada.
- Shapiro-Wilk, S. S. et M. B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* **52**:591-610.
- Sheedy, G. 1990. Résultats de l'enquête de 1989 sur la stabilité des plants de diverses plantations de pin gris et d'épinette noire. Note de recherche forestière no. 38. Gouv. du Québec, Min. Énerg. Res. Ste-Foy, Québec.
- Sheedy, G. 1991. La stabilité des plants en contenant : qu'en est-il exactement ? Résultats des évaluations réalisées dans 43 plantations de pin gris et d'épinette noire de l'Abitibi. Note de recherche forestière no. 45. Gouv. du Québec, Min. Énerg. Res., Ste-Foy, Québec.
- Sheedy, G. 1993. La stabilité des plants en contenant : résultats des évaluations réalisées dans 54 plantations de pin gris d'Abitibi. Note de recherche forestière no. 47. Gouv. du Québec, Min. Énerg. Res.

- Sheedy, G. 1996. La stabilité des plantations : résultats des évaluations réalisées en 1989 et 1994 dans six plantations de pin gris de l'Abitibi. Note de recherche forestière no. 69. Gouv. du Québec, Min. Énerg. Res., Ste-Foy, Québec.
- Sims, H. P. 1964. Root development of jack pine seedlings on burned-over dry sites in southeastern Manitoba. Department of Forests, Ottawa, Canada.
- St-Pierre, H., R. Gagnon et P. Bellefleur. 1992. Régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Québec. Can. J. For. Res. **22**: 474-481.
- Stowe, D. C., M. S. Lamhamedi, S. Carles, B. Fecteau, H. A. Margolis, M. Renaud et P. Y. Bernier. 2010. Managing irrigation to reduce nutrient leaching in containerized white spruce seedling production. New For. **40**:185-204.
- Stowe, D. C., M. S. Lamhamedi et H. A. Margolis. 2001. Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized *Picea glauca* seedlings in response to controlled irrigation regimes. Can. J. For. Res. **31**: 2200-2212.
- Strong, W. L. et G. H. La Roi. 1983. Root system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. Can. J. For. Res. **13**: 1164-1173.
- Sutton, R. F. 1980. Root system morphogenesis. New-Zealand J. For. Sci. **10**:264-292.
- Timmer, V.R. 1996. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. New For. **13**: 275-295.
- Walsh, D., J. Allaire et D. Lord. 2011. Survie et croissance de mini-plants d'épinette noire reboisés en forêt boréale: Bilan de 10 ans de plantation. UQAC, Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, Chicoutimi, Québec, Canada.
- Walsh, D. et D. Lord. 2005. Performance en plantation du pin gris cultivés en récipients 126-25. UQAC, Chicoutimi, Québec, Canada.

